**Применение транспортной модели в задачах логистики складирования**

**Кузнецов В.О.**

Аспирант

Департамент логистики и управления цепями поставок

Национальный Исследовательский Университет «Высшая Школа экономики» (Санкт-Петербург, Россия)

**Kuznetsov V.O.**

Postgraduate student

Department of Logistics and Supply Chain Management

National Research University Higher School of Economics (St.-Petersburg, Russia)

**vokuznetsov@hse.ru**

**Ключевые слова:** линейное программирование, складская логистика, оптимизация, исследование операций, транспортная задача

**АННОТАЦИЯ**

Актуальность данного исследования обусловлена, с одной стороны, попыткой решения проблемы оптимального размещения запасов на складе, положительным эффектом которого может стать увеличение показателей оборачиваемости запасов и обеспеченности запасами. С другой стороны, была сделана попытка расширения списка задач, решаемых методами исследования операций. На сегодняшний день сфера применения методов исследования операций (в частности, транспортной задачи как частного случая линейного программирования) довольно ограничена. В соответствии с [Таха, 2011], транспортная задача – это проблема поиска оптимального распределения однородных объектов от аккумуляторов $(a\_{i})$ к приемникам $(b\_{i})$ с минимизацией затрат на перемещение. Каноничная форма транспортной задачи представляет аккумуляторы в роли точек отправления груза (склады), приемники в роли точек назначения (клиенты) и затраты на перемещение в роли транспортных затрат. По нашему мнению, парадигма применения данной модели ограничена использованием последней касательно лишь транспортной логистики. Фактически, мы можем найти применение данной модели относительно очень большего количества проблем в различных областях (микро-, мезо- или макроуровня). Данное исследование показывает, что объекты и переменные из каноничной транспортной модели могут быть представлены в роли объектов из различных областей (не ограничивающихся логистикой), тем самым помогая найти оптимальное решение конкретной проблемы. В данной работе аккумуляторы представлены в роли условных ячеек расположения продукта незавершенного производства (НЗП) на складе, приемники – производственные линии, и, затраты на перемещение в роли общего пробега погрузчиков от зон расположения НЗП к производственным линиям. Общий пробег погрузчиков предстает в виде функции затрат Z, которую необходимо минимизировать, что даст нам оптимальное расположение продуктов НЗП по отношению к производственным линиям (следующий этап производства).

**Обзор литературы**

**Успешные попытки решения транспортной задачи впервые были предприняты советским математиком Л.В. Канторовичем, которые были напечатаны в «докладах академии наук СССР» [**Kantorovich**, 1942]. Параллельно, в западных источниках задача была поставлена Хичкоком [**Hitchcock, **1941] и, впоследствии, детально разобрана Купмансом [**Koopmans, **1949], который во время Второй мировой войны работал над проблемой недостатка грузовых судов, которая представляла собой критическое узкое место. Как проблему линейного программирования ее впервые рассмотрел Дж. Данциг [**Dantzig, **1951], который, в свою очередь, ссылался на публикации Канторовича 1939 г. и 1942 г., а также на последующую его статью 1949 г., где Канторович предложил решение задачи методом потенциалов.**

**В последующие годы (вторая половина XX в.) активно развивалось множество методов исследования операций, помимо транспортной задачи, как части линейного программирования. После решения транспортной задачи, как таковой, ее использовали лишь в рамках транспортной логистики.**

**Например, можно выделить работу [Вентцель, 1988], в которой подробно были описаны различные методы исследования операций, в том числе и применение транспортной модели. Также стоит отметить работы [Сергеев, 2014; Дыбская, 2017], в которых достаточно подробно рассмотрены различные аналитические методы в управлении цепями поставок, в том числе затрагивается решение транспортной задачи.**

**Несмотря на широкое применение транспортной задачи, многие процессы управления цепями поставок (не связанные с транспортом), в которых возможно теоретическое и практическое применение транспортной задачи, испытывают недостаток применения такого методологического аппарата.**

**Методология**

**Значительная часть средств торговой, как и производственной, организации сконцентрирована в складских запасах, что определяет необходимость эффективного управления складом. Отсутствие оптимального управления этим направлением оборачивается снижением рентабельности бизнеса и увеличением финансовых затрат.**

**Последствия неоптимального размещения товарных запасов:**

**а) При избытке, это излишние траты, большие издержки хранения, рост кредитов, снижение удовлетворенности клиентов, и как следствие снижение прибыли;**

**б) При недостатке запасов, это уменьшение продаж, снижение уровня сервиса, снижение удовлетворенности клиентов, снижение количества клиентов, уменьшение оборотных средств, и также, как следствие, снижение прибыли.**

Согласно Conway, проблема оптимизации использования складских площадей [Conway, 1987] является актуальной для любого производственного предприятия, т.к. оптимальное размещение запасов позволяет компаниям:

- сокращать общее время работы погрузчиков (а также складских рабочих и т.п.);

- снижать издержки по перевозке запасов до следующего производственного этапа как следствие минимизации метража перевозок;

- снизить общие издержки на хранение запасов;

- обеспечить структурированное размещение запасов на складе.

Исходя из этого была поставлена цель: найти оптимальное распределение зон для размещения заготовок, предназначенных для 4-х видов машин, на складе НЗП (рис. 1).



Рисунок 1 - Разметка полезной площади склад НЗП объекта исследования (штриховка)

Потенциальными критериями оптимизации являлись: 1) минимизация расхода топлива погрузчиков; 2) минимизация общего метража подъездов погрузчиков от заготовок к машинам; 3) минимизация времени подъездов погрузчиков от заготовок к машинам.

Очевидно, что если решать задачу по 2-му критерию оптимизации: минимизации общего метража подъездов погрузчиков от заготовок к машинам, то это автоматически решает задачу по 1-му и 3-му критериям. Именно поэтому мы выбрали 2-й критерий оптимизации в качестве целевого.

В итоге анализа структуры полезной площади склада НЗП, было решено оптимизировать складские площади через решение транспортной задачи в виде задачи о назначениях. Данное решение было сделано исходя из следующих заключений:

1. Разделение всего склада на условные ячейки (рис. 2)сделало удобным представить отдельный склад в виде набора аккумуляторов ($α\_{i}$) транспортной задачи (исполнителей в задаче о назначениях);
2. Роль приемников ($β\_{j}$) (работы в задаче о назначениях) в поставленной задаче играют производственные линии (4 машины для изготовления продукта);

В качестве показателя эффективности для конкретной выделенной ячейки ($α\_{i}$) и конкретной производственной линии ($β\_{j}$) будет являться значение метража ($c\_{ij})$, которое преодолевается за месяц от данной ячейки до конкретной производственной линии при перевозе заготовок погрузчиками (см. таблицу 1).



Рисунок 2 - Разделение полезной площади склада НЗП на условные ячейки

Таблица 1 - Месячный метраж от каждой ячейки до конкретной производственной линии (фрагмент)

|  |  |
| --- | --- |
|  | Машины |
| Ячейки | A | B | C | D |
| A11 | 38780,6 | 59442,72 | 123240 | 9022,304 |
| A12 | 47662,24 | 65589,88 | 140177,6 | 12400,37 |
| A21 | 42647,18 | 64144,2 | 116490,9 | 8429,288 |
| A22 | 70364,02 | 80593,3 | 156654,7 | 15540,18 |
| A31 | 47853,66 | 67448,6 | 112576,7 | 7709,198 |
| A32 | 75570,5 | 83897,7 | 160568,9 | 16260,27 |
| A41 | 53060,14 | 70753 | 108662,5 | 6989,108 |
| A42 | 80776,98 | 87202,1 | 164483,1 | 16980,36 |
| A51 | 58266,61 | 74057,4 | 104748,3 | 6269,018 |
| A52 | 85983,45 | 90506,5 | 168397,4 | 17700,45 |
| A61 | 63473,09 | 77361,8 | 99826,73 | 5548,929 |
| A62 | 91189,93 | 93810,9 | 172311,6 | 18420,54 |
| A71 | 68679,57 | 80666,19 | 97452,3 | 4828,839 |
| A72 | 96396,41 | 97115,29 | 176225,8 | 19140,63 |

В матричном виде таблица 1 выглядит следующим образом:

$С= \left[\begin{matrix}с\_{11}&с\_{12}&с\_{13}&с\_{14}\\с\_{21}&с\_{22}&с\_{23}&с\_{24}\\…&…&…&…\\с\_{501}&с\_{502}&с\_{503}&с\_{504}\end{matrix}\right]$ (1)

Вспомогательная матрица X, элементы которой будут искомым решением принимает вид:

$X= \left[\begin{matrix}x\_{11}&x\_{12}&x\_{13}&x\_{14}\\x\_{21}&x\_{22}&x\_{23}&x\_{24}\\…&…&…&…\\x\_{501}&x\_{502}&x\_{503}&x\_{504}\end{matrix}\right]$ (2)

Задача заключается в том, чтобы разделить полезную площадь склада НЗП таким образом, чтобы общий показатель эффективности (месячный метраж) был минимальным. Для каждого из 4-х видов заготовок (заготовки для отправки на конкретную линию) должны быть выделена своя зона размещения. Исходя из производительности отдельных линий, зоны ограничены, пропорционально производительности, площадями. Каждая ячейка должна быть предназначена для конкретного вида заготовок, но возможны разделы одной ячейки между несколькими линиями (видами продуктов).

**Целевая функция** принимает вид:

$z=\sum\_{i=1}^{n=50}A\_{i}\*x\_{i}^{a}+\sum\_{i=1}^{n=50}B\_{i}\*x\_{i}^{b}++\sum\_{i=1}^{n=50}C\_{i}\*x\_{i}^{c}+\sum\_{i=1}^{n=50}D\_{i}\*x\_{i}^{d}\rightarrow min$

$z= \sum\_{j=1}^{m=4}\sum\_{i=1}^{n=50}c\_{ij}\*x\_{ij}\rightarrow min$

где $c\_{ij}-$ соответствующие значения месячного метража от i-й ячейки до j-й производственной линии; $i=\overbar{1,n}; j=\overbar{1,m}$;

 $x\_{ij}-$ значения от 0 до 1, отражающие долю ячейки, которая будет предназначена для размещения одного из 4-х видов заготовок.

**Ограничения:**

1) $\sum\_{j=1; i=1}^{m=4; n=50}x\_{ij}=1$

2) $\sum\_{i=1}^{n=50}x\_{i}^{a}+\sum\_{i=1}^{n=50}x\_{i}^{b}+\sum\_{i=1}^{n=50}x\_{i}^{c}+\sum\_{i=1}^{n=50}x\_{i}^{d}=50$

3) $\sum\_{i=1}^{n=50}x\_{i}^{a}\*S\_{i}^{яч}$ ≤ $S\_{A}$

 $\sum\_{i=1}^{n=50}x\_{i}^{b}\*S\_{i}^{яч}$ ≤ $S\_{B}$

 $\sum\_{i=1}^{n=50}x\_{i}^{c}\*S\_{i}^{яч}$ ≤ $S\_{C}$

 $\sum\_{i=1}^{n=50}x\_{i}^{d}\*S\_{i}^{яч}$ ≤ $S\_{D}$

где $S\_{i}^{яч}$- площадь ячеек (в данной задаче одинаковая у всех ячеек).

 $S\_{A}$,$S\_{B}$, $S\_{C}$, $S\_{D}$ - фиксированные значения площади, выделенной для заготовок каждого вида.

4) $x\_{i}^{a}\geq 0$

 $x\_{i}^{b}\geq 0$

 $x\_{i}^{c}\geq 0$

 $x\_{i}^{d}\geq 0$

где $x\_{i}^{a}$, $x\_{i}^{b}$, $x\_{i}^{c}$, $x\_{i}^{d}\in $Z $∀i$

**Результаты.**

Оптимальное решение по заданному метражу всех заданных ограничениях достигается при распределении, показанном в таблице 2 и значение месячного метража, достигаемого при таком распределении, будет равным 3 236 186 метров (таблица 2).

Полученное решение означает, что, например, ячейку A11 следует отдать под размещение заготовок машины A, ячейку A82 - для заготовок машины B, ячейку C3 - для заготовок машины D. Дробные значения означают, что некоторые ячейки компьютеру (для достижения оптимального решения) пришлось разделить между заготовками двух видов.

Таблица 2 - Результат поиска оптимального решения

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Машины |  |  |  |  |  |  |  |
| Ячейки | A | B | C | D | Пер. | A | B | C | D | Ито-го | Пло-щадь |
| A11 | 38781 | 59443 | 123240 | 9022 | x1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| A12 | 47662 | 65590 | 140178 | 12400 | x2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| A21 | 42647 | 64144 | 116491 | 8429 | x3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| A22 | 70364 | 80593 | 156655 | 15540 | x4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| A31 | 47854 | 67449 | 112577 | 7709 | x5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| A32 | 75570 | 83898 | 160569 | 16260 | x6 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| A41 | 53060 | 70753 | 108662 | 6989 | x7 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| A42 | 80777 | 87202 | 164483 | 16980 | x8 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| A51 | 58267 | 74057 | 104748 | 6269 | x9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| A52 | 85983 | 90506 | 168397 | 17700 | x10 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| A61 | 63473 | 77362 | 99827 | 5549 | x11 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| A62 | 91190 | 93811 | 172312 | 18421 | x12 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| A71 | 68680 | 80666 | 97452 | 4829 | x13 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| A72 | 96396 | 97115 | 176226 | 19141 | x14 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| A81 | 73886 | 83971 | 101582 | 3730 | x15 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| A82 | 101603 | 100420 | 180140 | 19861 | x16 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| A91 | 79093 | 87275 | 106159 | 3675 | x17 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| A92 | 106809 | 103724 | 184054 | 20581 | x18 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| A101 | 84835 | 90920 | 110476 | 4469 | x19 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| A102 | 112552 | 107369 | 188371 | 21375 | x20 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| A111 | 113968 | 108389 | 188875 | 21661 | x21 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| B11 | 70555 | 80508 | 155590 | 15641 | x22 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| B12 | 75226 | 83473 | 159101 | 16287 | x23 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| B21 | 79896 | 86437 | 162612 | 16933 | x24 | 0,59954 | 0,40046 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| B22 | 84567 | 89401 | 166124 | 17579 | x25 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| B31 | 89773 | 92705 | 170038 | 18299 | x26 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| B32 | 94980 | 96010 | 173952 | 19019 | x27 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| B41 | 100186 | 99314 | 177866 | 19739 | x28 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| B42 | 105393 | 102619 | 181780 | 20459 | x29 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| C1 | 122314 | 113686 | 193998 | 22723 | x30 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| C2 | 130392 | 118813 | 200071 | 23840 | x31 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 13 |
| C3 | 138469 | 123939 | 206144 | 24957 | x32 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 13 |
| D11 | 118026 | 111560 | 62829 | 10775 | x33 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 13 |
| D12 | 113241 | 108523 | 61534 | 10113 | x34 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 13 |
| D21 | 108456 | 105486 | 64843 | 9451 | x35 | 0 | 0 | 0,6115 | 0,3885 | 1 | 13 |
| D22 | 103670 | 102448 | 68441 | 8789 | x36 | 0 | 0,66335 | 0 | 0,3367 | 1 | 13 |
| D31 | 98885 | 99411 | 72039 | 8127 | x37 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 13 |
| E11 | 121031 | 115338 | 40696 | 11339 | x38 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 13 |
| E12 | 115480 | 111815 | 44870 | 10571 | x39 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 13 |
| E13 | 109929 | 108292 | 49043 | 9803 | x40 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 13 |
| E14 | 104378 | 104769 | 53216 | 9036 | x41 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 13 |
| E15 | 98827 | 101246 | 57389 | 8268 | x42 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 13 |
| F11 | 161037 | 140680 | 10879 | 17166 | x43 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 13 |
| F12 | 155678 | 137278 | 12548 | 16424 | x44 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 13 |
| F13 | 150318 | 133877 | 16578 | 15683 | x45 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 13 |
| F14 | 144958 | 130475 | 20607 | 14942 | x46 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 13 |
| F15 | 139599 | 127074 | 24636 | 14201 | x47 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 13 |
| F16 | 134239 | 123672 | 28666 | 13459 | x48 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 13 |
| F17 | 128879 | 120270 | 32695 | 12718 | x49 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 13 |
| F18 | 123520 | 116869 | 36724 | 11977 | x50 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 13 |
|  |  |  |  |  | Итого | 14,5995 | 17,0638 | 15,612 | 2,7251 | 50 |   |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  | Использ. | 189,794 | 221,829 | 202,95 | 35,427 |   |   |
|  |  |  |  |  | S | 189,794 | 232,099 | 202,95 | 35,427 |   | 660,27 |
|  |  |  |  |  |  План | 29% | 35% | 31% | 5% |   | 100% |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  | 22 | 42 | 31 | 5 |  |  |
| Целев. Функция =  |   | **3236186,3** |  |  |  | 145,259 | 277,313 | 204,68 | 33,014 |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Таким образом, мы получили оптимальное распределение зон для размещения каждого из 4-х видов заготовок. Графическое представление данного распределения, перенесенного из цифрового вида в визуальный, показано на рисунке 3.



Рисунок 3 - Распределение зон расположения заготовок

**Перманентное использование модели в целях интеграции с системой планирования запасов.**

Проведя необходимы вычисления, мы нашли оптимальные зоны размещения заготовок на складе НЗП. Данное распределение является оптимальным при данной производительности линий. Из месяца в месяц, производительность всех линий будет, так или иначе, отклоняться от плановой производительности, что будет приводить к другим оптимальным решениям данной задачи. Изменение условий задачи не вызовет трудностей, что делает применение данного способа оптимизации склада достаточно гибким. Он будет оставаться гибким до тех пор, пока фундаментальные условия задачи (расположение склада НЗП, расположение производственных линий и т.п.) не будут меняться.

Проводимые инвентаризации, а также проведение более частого (желательно, ежедневного или еженедельного) учета запасов и анализ запасов на складе НЗП позволит выявить отклонения от плановых (ожидаемых) показателей наличия того или иного вида заготовок на складе. Выявление данных отклонений позволит сравнить (рис. 4) фактически полученные данные о запасах за прошедший месяц с плановыми, которые отражают ожидаемое заполнение склада каждым из 4-х видов заготовок в связи с производительностью каждой из 4-х линий.

Другими словами, плановые показатели на рисунке 16 показывают те значения (в процентах), какую долю в общем объеме заготовок должен был иметь тот или иной вид заготовок исходя из производительности соответствующей линии.

Анализируя собранные данные, мы видим, что фактическое кол-во заготовок машины A и машины B не сошлось с соответствующими плановыми показателями. Для машины A получилось недоиспользование плановых площадей (18% факта по сравнению с 29% плана), а для машины B - использование сверх нормы выделенных площадей (42% факта по сравнению с 35% плана) (рис. 4).

Рисунок 4 – Доля заготовок на складе

В данной ситуации, будет целесообразным распределить зоны на следующий месяц иным образом, в соответствии с фактическими показателями, т.к. исходя из принципа наивных методов прогнозирования, последний период лучше всего предсказывает будущее. Таким образом, чтобы в следующем месяце не возникло вероятного дефицита места для заготовок вида B, мы можем передать часть выделенного места для заготовок A (так как у A - профицит места), зоне для заготовок B. Для осуществления этой операции нам хватит перенесения 7% полезной площади от зоны A к зоне B, что в итоге нам дает следующее распределение площади для 4-х видов заготовок (рис. 5):

Заготовки A: 22%

Заготовки B: 42%

Заготовки С: 31%

Заготовки D: 5%

*Примечание 4*: Отклонение фактического показателя заготовок вида C от плановых не столь значительно и в данном исследовании не рассматривалось.

Рисунок 5 – Планирование оптимальных зон размещения на следующий месяц

Решив задачу с указанными ограничениями по площади, мы получаем значение целевой функции: **3 275 698 метров**. Также мы получили искомое распределение зон на следующий месяц (рис. 6).



Рисунок 6 - Оптимальные распределения зон - а) до сопоставления с фактическими значениями; б) после сопоставления с фактическими значениями и решения ТЗ с новыми ограничениями на площадь.

Преимущества предлагаемого плана оптимизации:

* Отсутствие дефицита или профицита места для заготовок на последующие месяцы ввиду проактивных, а не реактивных действий.
* Данный алгоритм представляется целесообразным к осуществлению при условии, что по каким-то причинам склад начинает забиваться, и, дефицит\профицит места для заготовок определенной группы может отразиться на выпуске, и, как следствие, на прибыли.
* В нынешних условиях мы не знаем, какие заказы, на какую машину, и сколько их будет, к примеру, на середину или конец следующего месяца. Применение данной стратегии позволит нам спрогнозировать наиболее вероятный расклад событий и более точно разделить склад на оптимальные зоны.

**Заключение.**

В данном исследовании было предложено применение транспортной модели (задачи) в одном из процессов складской логистики. В решаемой задаче объекты находятся на микроуровне (в рамках одной производственной площадки), в отличие от каноничной транспортной задачи со складами и клиентами.

Дальнейшими векторами исследования, расширяющими решенную задачу, могут быть:

- Применение различных алгоритмов кластеризации в целях формирования кластеров зон расположения запасов;

- Интеграция решаемых задач в рамках полного цикла рабочих процессов логистики складирования.

|  |  |
| --- | --- |
| Вентцель, Е.С. (1988), *Исследование операций: задачи, принципы, методология*, Могилевский, А.А. и Чульский, Л.А. (ред.), Наука, Москва, Россия | Ventsel, E.S. (1988) *Issledovanie Operaciy: zadachi, principi, methodologia* [Operations Research: problems, principles, methodology], Mogilevskij, A.A. and Chulskij, L.A. (ed.), Science, Moscow, Russia |
| Дыбская, В.В. (2017), *Проектирование системы распределения в логистике*, ИНФРА-М, Москва, Россия | Dybskaya, V.V. (2017), *Proektirovanie systemi raspredeleniya v logistike* [Design of logistic distribution system], INFRA-M, Moscow, Russia |
| Лукинский В.С., Лукинский, В.В., Малевич, Ю.В. и Пластуняк, И.А. (2007), *Модели и методы теории логистики,* 2-е изд., Питер, Санкт-Петербург, Россия | Lukinskiy, V.S., Lukinskiy, V.V., Malevich, Y.V. and Plastunyak, I.A. (2007), *Modeli I metody teorii logistiki: Uchebnoe posobie* [Models and methods of logistics theory], 2nd ed., Piter, Saint-Petersburg, Russia |
| Сергеев, В.И. (2014), *Управление цепями поставок,* Юрайт, Москва, Россия | Sergeev, V.I. (2014) *Upravlenie cepyami postavok. Uchebnik dlya bakalavrov I magistrov.* [Supply Chain Management], URAIT, Moscow, Russia |

Chase, R.B. and Aquilano, N.J. (2004) *Operations Management for Competitive Advantage*, 10-th ed., McGraw Hill Higher Education, Boston, Toronto, London

Conway, R. and Maxwell, W. (1987), «The role of work-in-process inventory in serial production lines*»*, *Operations Research*, vol. 36, no 2, pp. 229-241.

Dantzig, G.B. (1951), «Application of the simplex method to a transportation problem», in *Activity analysis of production and allocation*, Кооpmans, Т. С. (еd), Wiley, New York, pp. 359—373.

Hitchcock, F. L. (1941), «Distribution of a Product from Several Sources to Numerous Localities», *Journal of Mathematical Physics*, no 20, pp. 224-230

Kantorovich, L. (1942), «*On the translocation of masses»*, *C. R. (Doklady) Acad. Sci. USSR (N. S.),* no 37, pp. 199-201

Kay, E. and Duckworth, E. (1957), «Linear programming in practice», *Journal of the Royal Statistical Society*. *Series C (Applied Statistics*), vol. 6, no 1, pp. 26-39.

Koopmans, T. С. (1949), «Optimum Utilization of the Transportation System», *Econometrica*, Vol. 17, Supplement: Report of the Washington Meeting (Jul., 1949), pp. 136-146

Luenberger, D.G. (2008), *Linear and nonlinear programming*, International series in operations research and management science, Springer, CA, USA

Matousek, J. and Gartner, B. (2006), *Understanding and using linear programming*, Springer, New York, USA

Taha, H.A. (2011), *Operations research. An introduction,* 9th ed., Pearson